

Prädiktive Wärmeflussregelung solaroptimierter Wohngebäude -Thermische Simulation komplexer Gebäude-

Dipl.-Ing. Werner Hube, Dr.-Ing. C. Wittwer
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofsstr. 2, 79110 Freiburg
Tel.: 0761/4588-5408, Fax.: 0761/4588-9000
Werner.Hube@ise.fhg.de, <http://www.ise.fhg.de>

Zusammenfassung

Moderne Wohngebäude heute, besonders aber die der Zukunft, werden sich zu einem großen Teil selbst mit Wärme versorgen. Hierbei spielen Entwicklungen im Bereich der Fassadenkonstruktionen eine zentrale Rolle. Zusätzlich zum erhöhten solaren Wärmeeintrag kommen die Eigenschaften der Wärmespeicherung und verzögerten Wärmeabgabe hinzu. Aufgrund dieser Eigenschaften definiert sich das Gebäudeverhalten neu und komplexer. Im Rahmen der Entwicklungen von Wärmeflussregelungen in solarthermisch beheizten Wohngebäuden mit neuartigen Fassaden, wird in diesem Beitrag auf die Modellentwicklung moderner Fassadenkonstruktionen hinsichtlich Transparenter Wärmedämmung und Phasenwechselmaterialien im Wandverbund, kombiniert mit der regelungstechnisch interessanten Neuentwicklung von Verschattungseinrichtungen über schaltbare Schichten am Fenster, eingegangen. Der Beitrag beschreibt den Entwurf eines Regelungskonzeptes für die thermische Raumklimaregelung. Diese Untersuchungen basieren auf komplexen Simulationsmodellen, wobei bei der Modellentwicklung der neuartigen Fassadenelemente auf reale Messwerte zurück gegriffen werden konnte.

1 Einleitung

Modernes und verantwortungsbewusstes Bauen beinhaltet das „Solare Bauen“, also die integrale Planung und Realisierung von Gebäuden unter Berücksichtigung des optimalen Einsatzes von passiver und aktiver Solarenergie zum Heizen und Beleuchten. Zudem haben die gesetzlichen Vorgaben der aktuell eingeführten Energieeinsparverordnung von 2002 [EnEV01] zur Folge, dass die Solarenergienutzung am Gebäude an Bedeutung gewinnt. Aus dem optimalen Einsatz von passiver und aktiver Solarenergie folgt eine weitere Reduktion des Primärenergiebedarfs.

Solaroptimierte Gebäude mit erhöhten passiven Gewinnen weisen gegenüber herkömmlichen Gebäuden ein komplexeres Verhalten gegenüber der Solarstrahlung auf. Die bekannte nahezu lineare Abhängigkeit der spezifischen Heizleistung gegenüber der Außentemperatur ändert sich dahingehend, dass die Solarstrahlung deutlichen Einfluss auf den Raumwärmebedarf hat.

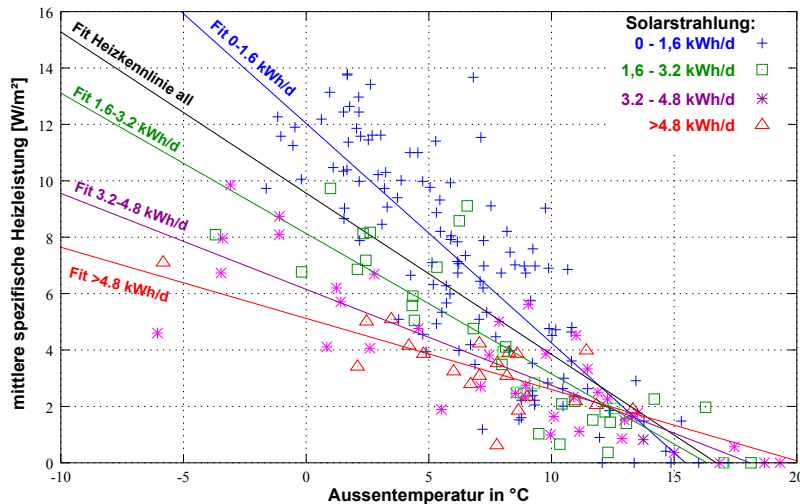


Abbildung 1: Gemessener Tagesheizenergiebedarf eines modernen sehr gut gedämmten Wohngebäudes mit hohen passiven solaren Gewinnen, in Abhängigkeit der Aussentemperatur und der Solarstrahlung.

Wie Auswertungen an modernen Gebäuden mit hohen passiven solaren Gewinnen gezeigt haben, wirken sich die Baumaßnahmen an den typisch kalten und klaren Wintertagen am deutlichsten aus[Hub01]. Die Darstellung in Abbildung 1 zeigt diesen Zusammenhang auf. Man erkennt, dass mit Zunahme der täglichen Strahlungsenergie die Heizenergie für diesen Tag sinkt. Die Streuung der Heizleistung ist größer.

Die Bildung von Regressionsgeraden für unterschiedliche Einstrahlungsklassen zeigt, dass an Tagen mit hoher Einstrahlung die Heizkennlinie flacher wird. Trotz kalter Außentemperaturen sinkt die benötigte Heizenergie.

2 Komplexes Gebäudemodell

Marktüblich sind heutzutage Regelungssysteme, die jedes Teilsystem (Heizkreis, Verschattung, Lüftung) unabhängig voneinander kontrollieren. Die Folge ist ein hoher sensorischer Aufwand und ein nicht abgestimmtes Regelverhalten. Modernes Wärmemanagement zeichnet sich aber durch systemübergreifende Regelungskonzepte aus. Voraussetzung für systemübergreifende, regelungstechnische Untersuchungen von komplexen Gebäude- und Anlagenkombinationen sind Simulationsumgebungen, die dynamische Zusammenhänge im Sekundenbereich auflösen.

Diese Eigenschaft bringt die Entwicklungs- und Simulationsumgebung *ColSim*¹ mit. [Wit99] Innerhalb der Simulationsumgebung wurden Standardgebäude gemäß IEA-SHC TASK 26² "Solar Combisystems" definiert³, die als Referenzwärmesenke für die Simulation thermischer Solarkomponenten und -systeme dienen. Diese Wohngebäude wurden um folgende Eigenschaften moderner Gebäudeentwicklungen erweitert:

- **Transparente Wärmedämmung (TWD)** Sie vereint die Eigenschaft einer Dämmung, d. h. dem Wärmeabfluss einen hohen Widerstand entgegen zu setzen, und gleichzeitig

¹www.colsim.de

²International Energy Agency - Solar Heating & Cooling - TASK 26

³Die Modellbeschreibungen der TASK 26 wurden in TRNSYS realisiert. Die Ergebnisse dienen als Referenz zu den Simulationsmodellen in *ColSim* und es wurden damit eine „Cross-Validierung“ durchgeführt. [Busc02]

den Energiefluss von außen nach innen in Form von Strahlungsenergie zu ermöglichen. Hieraus resultieren die wichtigsten Parameter der TWD, der k-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) und der g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad).

- **Phasenwechselmaterial (PCM)**⁴ Der Latentwärmespeicher im Wandverbund verfolgt die Idee im Phasenwechsel solare Wärme zu speichern und das Wohnhaus damit zu klimatisieren. So kann in Wintermonaten solare Energie gespeichert werden, die zeitverzögert wieder an den Raum abgegeben wird. Im Sommer kann durch die Absorption der Wärme in der Wand, die Zahl der Überhitzungsstunden reduziert werden. Genutzt wird die Wärmespeicherung bei konstanter Temperatur, welche durch die Enthalpieänderung beim Phasenübergang (z. B. fest → flüssig) bewirkt wird.
- **Nachtlüftung** Die Nachtlüftung spielt bei Gebäuden mit PCM eine wichtige Rolle. Mit der Konditionierung⁵ des Latentmaterials im Sommer durch Aggregatswechsel in den festen Zustand, ist das Material für den nächsten Tag wieder bereit „überschüssige“ Wärme aufzunehmen. Die Wärme muss aktiv hinausgelüftet werden
- **Hochwertige Fenster und stellbare Verschattungssysteme** Der Einsatz von großen Fensterflächen führt zu hohen Strahlungserträgen bei geringen Transmissionsverlusten. Im Sommer führt die großflächige Verglasung dagegen zu unerwünschten Temperaturerhöhung in den Räumen. Wirksame Sonnenschutzsysteme können diese Überhitzung verhindern.
- **Solarunterstütztes Heizkonzept** Aufgrund der verbesserten und kostengünstigeren Systemtechnik und dem sinkenden Heizwärmebedarf moderner Wohngebäude werden zunehmend Systeme zur solaren Heizungsunterstützung eingesetzt. Sogenannte “Solare Kombisysteme” steigern die solare Deckung des Wärmebedarfs weiter. Dieser zusätzliche solare Wärmefluss muss in der Wärmeflussoptimierung berücksichtigt werden.

Als Beispiel einer Modellbildung innerhalb der Simulationsumgebung *ColSim* wird das Modell zur transparenten Wärmedämmung erläutert. Das Modell zur Abbildung der Eigenschaften der TWD baut auf dem diskretisierten Modell der Wand (*ColSim*) auf. Die Möglichkeit die Wand aus unterschiedlichen Layern zusammen zu setzen, wird genutzt, und es wird die äußerste Schicht des Wandaufbaues als transparente Wärmedämmung definiert. Hierzu wird das *ColSim*-Wandmodell erweitert. Sie ist in der Abbildung 2, dem thermischen Ersatzschaltbild einer Wand mit transparenter Wärmedämmung, ersichtlich.

Die transparente Wärmedämmung erhält einen der n Knoten. Dieser Knoten ist über den Wärmedurchgangswert $\frac{k_{ATWD}}{2}$ mit dem benachbarten Knoten und der Wandoberfläche verbunden. Die Sonnenenergie Igt_{trans} , die von der TWD auf den Absorber⁶ durchgelassen wird, wird in den Knoten hinter der ersten Wandschicht (TWD) eingekoppelt. Hierzu wird die vom Strahlungsprozessor berechnete orientierte Globalstrahlung Igt durch den g -Wert der TWD reduziert:

$$Igt_{trans} = Igt * g_{TWD} \quad (1)$$

⁴engl.:Phase Change Material

⁵Entladung des PCMs

⁶schwarz gestrichene Außenwandfläche.

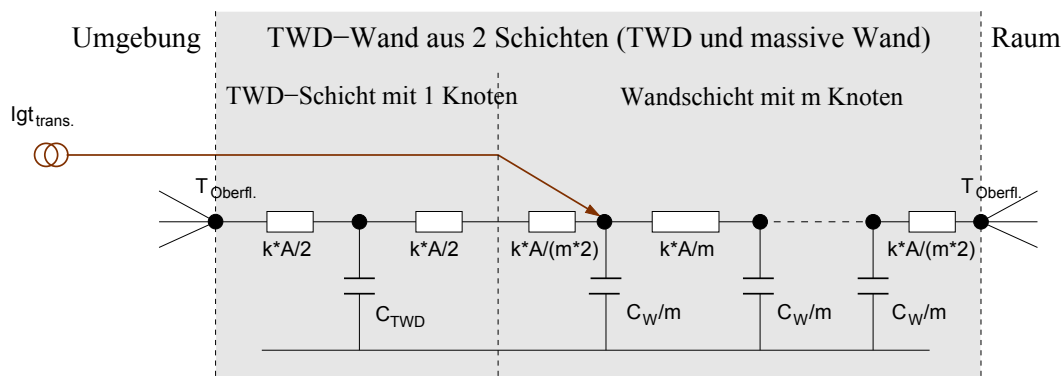


Abbildung 2: *Thermisches Ersatzschaltbild einer TWD-Wand. Die Transparente Wärmedämmung erhält im Wandaufbau einen Knoten, während die restliche Wand sich aus mehreren Layern (Baustofftyp) mit m Knoten zusammensetzen kann.*

Mit dieser Modellierungsmethode wird die resultierende Solarstrahlungsenergie direkt auf die Außenwand aufgeprägt. Wärmeleitung überträgt einen Teil der Wärme durch die Wand hindurch in den Raum. Nach außen hin wirkt die Wabenstruktur der TWD wie eine Dämmung und unterbindet die Konvektions- und Strahlungsverluste weitestgehend.

Basierend auf dem validierten Modell nach TASK 26 [Hub02, Busc02] wurde durch die Erweiterungen um die oben genannten Systemkomponenten ein Modell geschaffen, welches sich als besonders solarsensibles Gebäude charakterisiert. Nach der Analyse zum thermischen Gebäudeverhalten gilt es, die solare Nutzung in aktiver und passiver Form, bei uneingeschränkten Behaglichkeitsbedingungen⁷ zu optimieren. Die zur Verfügung stehende Wärme muss möglichst verlustfrei und zeitlich abgestimmt verteilt und gespeichert werden.

Dies ist Aufgabe der Regelung. Modellbasierte Regler bieten hier die Möglichkeit, systemübergreifende Konzepte zu realisieren, die zur gewünschten Optimierung der Wärmeversorgung führen.

3 Modellbasierte Regelung

Der Entwurf klassischer Regelungen bedient sich dynamischer Modelle (mathematisch DGL's) zur Lösung des regelungstechnischen Problems. Die Charakteristika der Regelstrecke gehen in entscheidender Weise in die Wahl der Regelparameter ein. Der Regler selbst beinhaltet jedoch nicht das Modell [Lun01]. Wird das Modell Bestandteil des Reglers, wird dieses Verfahren als *Internal Model Control* (IMC) bezeichnet. Die allgemeine Struktur eines IMC-Regelkreises ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die modellbasierte Regelung eignet sich besonders zur Vorhersage von Zustandsgrößen über einen Prädiktionshorizont. Dies erfordert jedoch die Kenntnis von Führungs- und Störgrößen, die das System in der Zukunft prägen werden. Man spricht dann von *Model Predictive Control* (MPC).

⁷Die Komfortbedingungen sind zusätzlich noch nutzerspezifisch.

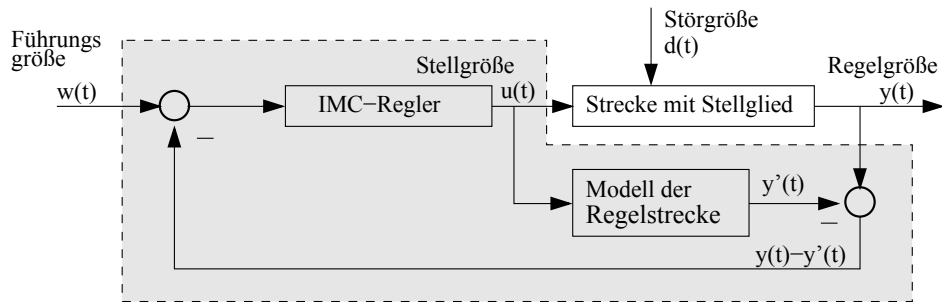


Abbildung 3: Struktur eines IMC_Regelkreises (Quelle: [Lun01])

Die Funktionsweise eines prädiktiven Reglers zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden beruht auf der Vorhersage des Klimas, der Lasten und der Nutzungszeiten. Großes Potential liegt in der Prognose der Solarstrahlung, die bei solaroptimierten Gebäuden eine wichtige Rolle spielt. Aus der prognostizierten Wirkungsgröße lässt sich eine Optimierung des Heiz- und Verschattungssystems herleiten. Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Ablauf für den Heizfall gegenüber der konventionellen Führung auf.

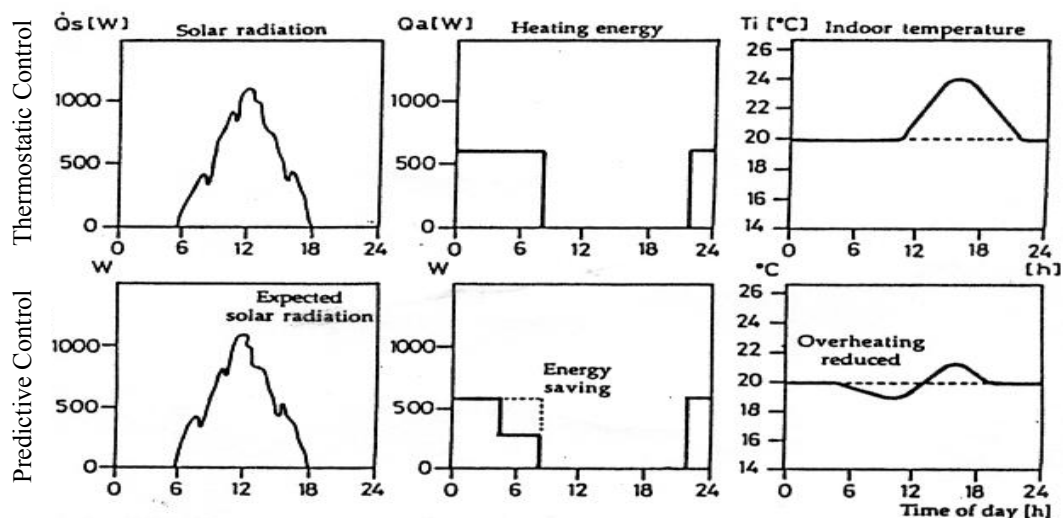


Abbildung 4: Funktionsweise eines prädiktiven Reglers zur Heizenergieeinsparung. (Quelle: Ferguson [Fer90])

Aufgrund der zu erwartenden Solargewinne, wird der Energieeintrag durch die Heizung reduziert. Die Folge ist ein Absinken der Raumtemperatur. Durch die Strahlung steigt die Temperatur wieder in den geforderten Bereich. Erst am Abend muss wieder geheizt werden. Die herkömmliche Regelung lässt diese kurzzeitige Absenkung der Raumtemperatur nicht zu. Die Solarstrahlung überheizt den Raum in der Folge. Der Nutzer wird die überschüssige Wärme hinauslüften um seine gewünschte Raumtemperatur zu erhalten. Am Abend muss zur Deckung der Transmissionsverluste in beiden Fällen wieder geheizt werden. Die Energieeinsparung durch den Prädiktor liegt in der vorzeitig reduzierten Wärmeabgabe durch die Heizung.

Zustandsvorhersage mittels Wettervorhersage und Modellreduktion

Im folgenden Ansatz bedient sich das Regelungssystem zur Prädiktion der zur erwartenden Solargewinne für das Gebäude einer zuverlässigen Wettervorhersage⁸. Mit Hilfe der Modellreduktion, die das komplexe Gebäudeverhalten durch ein Modell mit wesentlich niedrigerer Ordnung approximiert, kann eine Zustandsvorhersage bezüglich der Raumtemperatur innerhalb eines Prädiktionshorizontes gemacht werden. Das Näherungsmodell ist so zu wählen, dass es die dominanten Charakteristika enthält.

Simulationsergebnis

Realitätsnahe Simulationen werden dazu genutzt, modellbasierte Regelungskonzepte zu erproben. Die hohe zeitliche Auflösung der Dynamik ermöglicht die Analyse von Kurzzeitverhalten⁹.

Zum Vergleich der prinzipiellen Darstellung zur Funktionsweise eines prädiktiven Reglers zur Heizenergieeinsparung (Abb. 4) zeigt Abbildung 5 einen Tag an dem das prädiktive Regelungskonzept zur frühzeitigen Abschaltung der Heizung geführt hat.

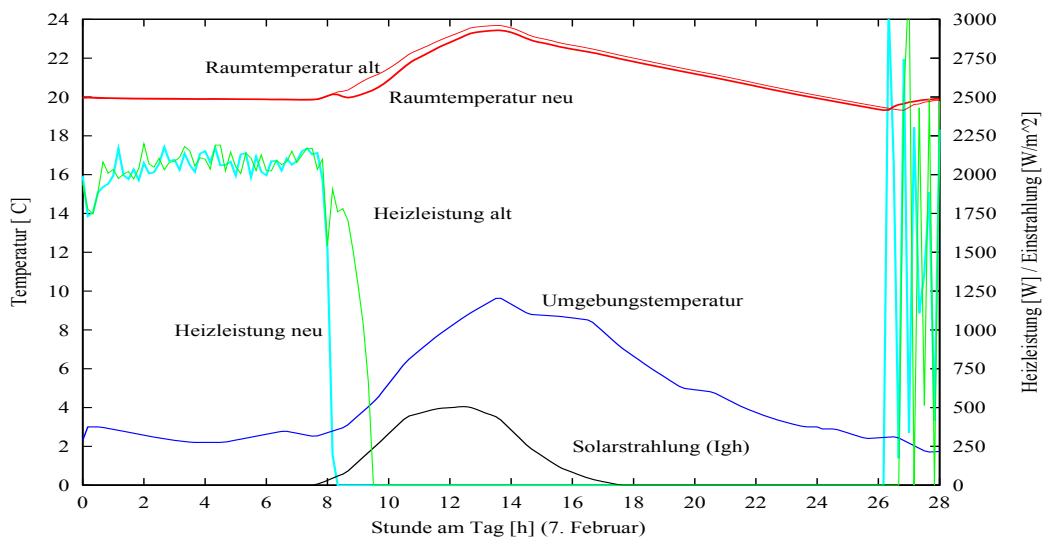


Abbildung 5: Beispiel zur vorzeitigen Abschaltung der Heizung durch den Prädiktor aufgrund zu erwartender passiver Gewinne. Das frühe Abschalten führt zu einer geringeren Raumtemperatur und damit in Folge zu einem vorzeitigen Heizenergiebedarf in der Nacht. Die Vergleicheskurven für eine herkömmliche Regelung sind mit eingetragen.

Es bestätigt sich genau der erwartete Raumtemperaturverlauf, der auch in Abbildung 4 dargestellt ist. Die Raumtemperatur folgt der Vergleichstemperatur mit etwas Verzögerung, da es nach Abschalten der Heizung zuerst zu einer Abkühlung im Raum kommt. Sie erreicht nicht die Höhe der Vergleichstemperatur und kühlt zum Abend hin früher auf Solltemperatur ab. Dies hat aber im Gegensatz zur Abbildung 4 zur Folge, dass die Heizung früher wieder in Betrieb geht (ca. 2.00 Uhr am folgenden Tag). Die konventionelle Heizungsregelung folgt

⁸Es kann z. B. über das Internet eine tägliche Vorhersage der zu erwartenden stündlichen globalen Einstrahlung sowie der mittleren stündlichen Außentemperatur erfolgen.

⁹Fluidlaufzeiten (z. B. Heizkreis) und die Reaktion der Regelung auf äußere Einflüsse

mit einer halben Stunde Verspätung (ca. 2.30 Uhr). Somit verringert sich die Energieeinsparung am Morgen durch einen erhöhten Verbrauch am Abend.

4 Fazit

Mit der zunehmenden Komplexität im thermischen Gebäudeverhalten und der Vernetzungsmöglichkeit von Teilsystemen (Heizung, Lüftung, Kühlung, Verschattung) werden der Wärmeflussregelung neue Chancen zur energetischen Optimierung eröffnet, die es zu untersuchen gilt.

Beispiele übergeordneter Regelungskonzepte, wie in Abbildung 6 dargestellt, müssen entwickelt werden. Es gilt moderne Konzepte wie Adaption, Prädiktion oder Fuzzy-Control auf

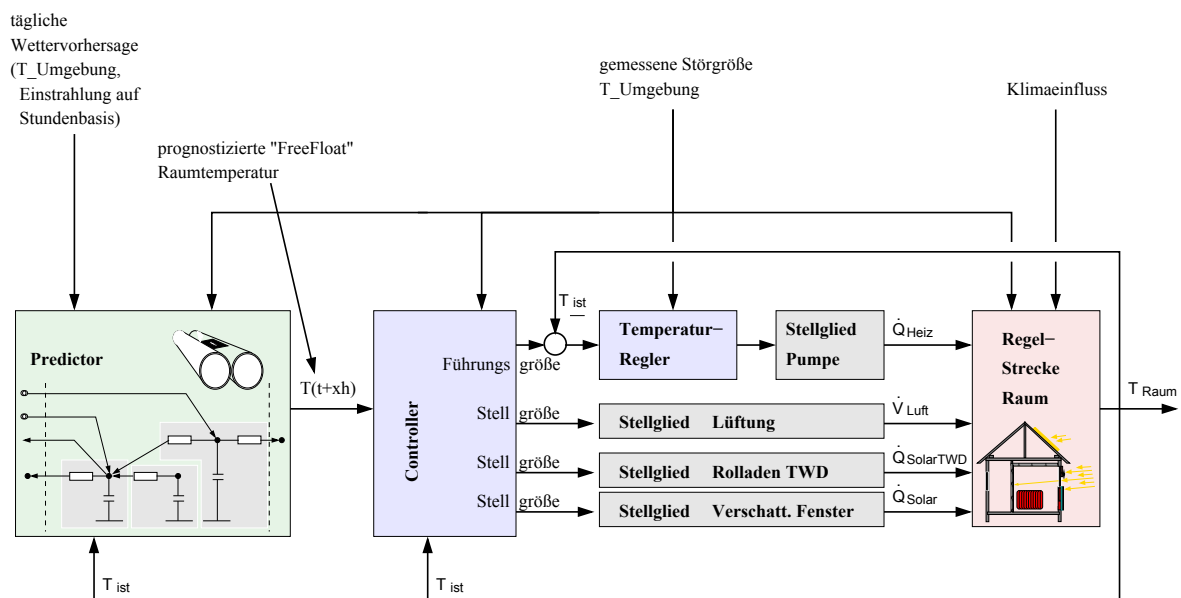


Abbildung 6: Aufbau einer übergreifenden Regeleinheit mit Zustandsschätzer, Controller und untergelagerter Heizkreisregelung, integriert in den geschlossenen Regelkreis.

ihre Nützlichkeit in der Optimierung komplexer Systeme zu erproben. Wichtigstes Hilfsmittel hierzu ist die Simulation. Innerhalb der Simulationsumgebung *ColSim* existiert eine Komponentenbibliothek, die zur regelungstechnischen Untersuchung moderner Gebäudesysteme herangezogen werden kann.

Literatur

- [Busc02] Buschmann, S.; Hube, W.; Wittwer, C.: Das *ColSim* Gebäudemodell: Eine realistische Wärmesenke zur Simulation solarer Kombisysteme. 12. Symp. Thermische Solarenergie OTTI-Kolleg, Staffelstein 2002.
- [EnEV01] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. EnEV, November 2001.

- [Fer90] Ferguson, A. M.: Predictive Thermal Control of Building Systems. Dissertation EPFL, Lausanne (Schweiz) 1990
- [Hub01] Hube W.; Wittwer, C.: Betrachtungen zur Heizkennlinie eines Niedrigenergie-Mehrfamilienhauses und *ColSim*-Erweiterungen zur Untersuchung integraler Regelungen zur Wärmeversorgung. 11. Symp. Thermische Solarenergie OTTI-Kolleg, Staffelstein 2001, 214-219
- [Hub02] Hube, W.; Wittwer, C.: Rücklauftemperatur der Heizung als Zustandsindikator solarer Gebäude -Systemoptimierung durch Rücklaufbegrenzung-. 13. Internationales Sonnenforum, Berlin 2002, S. 310-317
- [Lun01] Lunze, J.: Regelungstechnik 1. 3., erw. Auflage; Berlin: Springer-Verlag 2001
- [Wit99] Wittwer, C.: ColSim -Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen. Dissertation an der Technischen Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1999